# پیادهسازی لولای الاستیک جهت انجام آزمایش سازهای بر روی مدل یک شناور لاغر در حوضچه کشش

كريم اكبرى وكيل آبادى ، محمدرضا خدمتى ، حبيب ا ... سيارى ً

khedmati@aut.ac.ir

۱ - دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۲- دانشیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۳- دانشیار دانشگاه عالی دفاع ملی

چکیدہ

با افزایش تقاضا برای حمل و نقل سریع در دریا لازم است تا بتوان قیود مرتبط با سرعت پایین شناورها را مرتفع نمود. این تقاضا بیشتر در حوزه دفاعی و حمل مسافر میباشدکه الزام به داشتن شناورهای تندرو تک بدنه یا چند بدنه را به دنبال خواهد داشت. با افزایش اندازه و سرعت شناورها، نیاز به توسعه دانش درک بارهای دینامیکی سازهای و پاسخ های سازه می باشد. از اهم مواردی که طراحان علاقه مند به استخراج آن می باشند، ممانهای خمشی و نیروهای برشی در امواج و نیروهای ناشی از کوبش می باشد. از جمله روشهای موجود برای پیش بینی نیروهای موثر و پاسخهای سازهای می توان به آزمایش شناور در مقیاس واقعی، روشهای عددی و آزمایش مدل فیزیکی اشاره نمود. در آزمایش مدل از روشهای هیدروالاستیک،ستون فقرات صلب و ستون فقرات انعطاف پذیر بهره گرفته میشود. در روشهای ستون فقراتی، از یک تیر سرتاسری بر روی مدل استفاده میشود. چگونگی پیاده سازی تجهیزات اندازه گیری بر روی تیرهای صلب و انعطاف پذیر متفاوت از یکدیگر می باشد. در این پژوهش، مشخصات ابعادی لولاهای الاستیک بکار رفته در تیرهای انعطاف پذیر در مدل ها متفاوت از یکدیگر می باشد. در این پژوهش، مشخصات ابعادی لولاهای الاستیک بر رفته در تیرهای انعطاف پذیر در مدل هر ا

واژگان کلیدی : تشابه سازهای، آزمایش مدل، لولای الاستیک، ستون فقرات.

۹٣/•٧/٢ •	تاريخ دريافت مقاله :
۹۴/۰۸/۰۵	تاريخ پذيرش مقاله :

## سال دوم - پاييز و زمستان ۱۳۹۴

۱– مقدمه

امروزه از آزمایشهای مدل سه بعدی جهت اندازه گیری بارهای دینامیکی موج در مقیاس مدل، با شرایط موج کنترل شده، جهت ارزیابی بارهای سازهای و پاسخهای ارتعاشی وایپینگ استفاده می شود. موسسات ردهبندی برای پیشبینی بارهای سازهای وارد بر شناور، به جای بهره گیری از تحلیلهای آزمایشگاهی نیروهای موج القایی به شناور، از روابط استخراج شده بر اساس تجربیات بر گرفته از شناورهای قبلی و نتایج تئوریهای ساده شده، استفاده می کنند[1]. غیرخطی بودن نیروی امواج و مشکلات برخاسته از پیامدهای آن الزام می دارد که برای معتبرسازی روش های عددی از روش های آزمایشگاهی بهره گرفته شود[7].

روش آزمایش مدل در مقیاسهای کوچکتر یکی از شاخههای علم معماری کشتی است که مبتنی بر تحلیل ابعادی می باشد. در سالهای اخیر از مدل هایی مناسب به منظور اندازه گیری پاسخ سازهای شناور در شرایط مختلف عملیاتی، استفاده شده است. سابقه استفاده از مدل در معماری دریایی به کار آزمایشگاهی ویلیام فرود در سال ۱۸۷۴ میلادی برای تعیین مقاومت و دریامانی برمی گردد. برای برقراری شرایط تشابه بین مدل و شناور واقعی از دو روش تحليل ابعادى و استفاده مستقيم از معادلات حاكم بهره گرفته میشود. کورکوت و همکارانش[۳] نیروها و گشتاورهای موثر بر مدل کاملاً الاستیک یک فروند شناور رو-رو را در حالتهای سالم و آسیبدیده با کمک کرنشسنجهای میلهای اندازه گیری نمودند. چان و همکاران[۴] بارهای عمومی موج وارد بر یک شناور رو- رو را به روشهای تجربی و عددی به دست آورده و با هم مقایسه کردند.یاماموتو و همکارانش[۵] نیز از یک مدل الاستیک تجهیز شده به مجموعهای از کرنشسنجها برای اندازه گیری کرنشهای منتجه استفاده نمودند. ناوار و همکارانش[۶] از مجموعهای از یک مدل چندبخشی، یک سیستم اندازه گیری مناسب و تعدادی کرنشسنج برای استخراج نیروها و گشتاورهای اعمالی بر مدل استفاده نمودند. اینگودرومن[۶] در رساله دکتری خود، با استفاده از یک مدل چندبخشی مبادرت به استخراج نیروهای القایی از طرف موج بر بدنه شناور نمود و سپس، نتایج حاصل شده را با نتایج بدست آمده از محاسبات عددی انجام شده بر روی

شناور واقعی مقایسه کرد. جیسون لاوروف و همکارانش [۸] از یک مدل فریگیت چندبخشی به منظور استخراج نیروها و گشتاورها در طول بدنه شناور بهره بردند. چان و همکاران [۱۳] حرکات دامنه بلند و نیروهای ناشی از موج را بر روی یک کشتی رو- رو در امواج مورب در شرایط سالم و آسیب دیده مورد مطالعه قرار دادند.

بهره گیری از یک شناور باریک با پروفیل سینه شکافنده موج برای اولین بار در این مقاله به آن پرداخته شده است. نیروهای اعمالی بر اینگونه شناورها را نمی توان به کمک روابط ارائه شده توسط موسسات رده بندى استخراج نمود. بیشتر تحقیقات صورت گرفته بر روی شناورهای معمول می باشد. برای اینکه بتوان به کمک آزمایش مدل ممانهای اعمالی بر شناور را در شرایط مختلف جوی بدست آورد نیاز است که با بهره گیری از قوانین تشابه سازه ای و ساخت یک مدل مناسب (ستون فقراتی) نسبت به اندازه گیری اقدام نمود. مهمترين پارامتر نوع لولای الاستيک جهت اتصال بخشهای مختلف مدل به یکدیگر می باشد.در این مقاله، چگونگی استخراج مشخصات ابعادی لولاهای الاستیک بکاررفته در تیر انعطاف پذیردریک مدل یک و نیم متری از یک شناور تک بدنه لاغر و همچنین، نحوهی پیاده سازی آنها برای انجام آزمایشات به تفصیل مورد بررسی قرار مي گيرد.

## ۲- مدلسازی شناور هدف

امروزه بهواسطه ملاحظات اقتصادی، توسعه شناورهای تک بدنه برای راحتی خدمه، مسافرین و تجهیزات برای کاربریهای مختلف اعم از تجاری و غیرتجاری از اهداف طراحان شناورها محسوب میشود. برای اینکه بتوان کاهش مقاومت موجسازی وکاهش مقاومت متاثر از فرم هندسی بدنه را در طراحی بدنه لحاظ نمود، لازم است تا از شناورهای تکبدنه کاملا باریک (لاغر) بهره گرفت. ازمنظر شناورهای تکبدنه کاملا باریک (لاغر) بهره گرفت. ازمنظر اسپری آب در ناحیه سینه شناور، ورود آرام سینه شناور در راستای عمودی به درون امواج، حداقل افت سرعت به علت جذب حداقل انرژی از موج، بهره گیری از هندسه تیز در بودن خطوط هموارتر آبخور و خمیدگی بسیارکم در جلوی شناور که سبب فرو رفتن تدریجی در آب شده و در نتیجه کوبش کمتری را به دنبال خواهد داشت، اشاره نمود.

مطالعه بر روی مدل ها به منظ ور جلوگیری از اشتباهات پرهزینه و برای دسترسی به اطلاعاتی که در طرح الگو کمک کننده است، انجام می پذیرد. از آنجاکه تغییر مشخصات ابعادی یک مدل در مقایسه با شناور واقعی نسبتاً کم هزینه تر می باشد، لذا می توان از نتایج آزمایشگاهی در طراحی استفاده نمود. آزمایش مدل علیرغم محدودیتهای حاکم بر آن، در بسیاری از موارد، بی نهایت با ارزش بوده و استفاده از مدل ها در حل مسائل امروزی مهندسی رو به گسترش است. البته، این نکته را می بایست در نظر داشت که برقراری قواعد تشابه هندسی (ضریب مقیاس $\frac{2L}{L_m} = \lambda$ ) از دیدگاههای سینماتیکی و دینامیکی بین مدل و شناور واقعی الزامی می باشد. که در آن  $L_3$  و آزمایشگاهی می باشند.

### ۳- روشهای موجود برای مدلسازی

برای انجام آزمایش های هیدرودینامیکی، برقراری تشابه مكانيكي بين شناور واقعي و مدل مقياس شده كفايت مي کند. این در حالی است که برای انجام آزمایشهای سازهای نیازاست تاتشابه سازهای بین شناور واقعی و مدل مقیاس شده با ظرافت خاصی برقرار گردد. برقراری کامل تشابه هندسی در آزمایشهای سازهای بسیار مشکل بوده و در برخی مواقع غیرممکن است. از این رو لازم است تا بایستی این مشکل به صور تنسبی برطرف گردد. برای ساخت مدل جهت انجام آزمایشهای سازهای با رعایت قوانین تشابه، سه روش وجود داردکه در زیربه آنها اشاره می شود (شکل(۱)). قابلیتها، معایب و مزایای هر یک از این روشها درجدول(۱) ارائه شده است. الف) مدل كاملاً الاستيك ييوسته (هيدروالاستيك) [٨]. ب) مدل چند بخشی با فنرهای الاستیک مابین بخشهای سخت (روش ستون فقراتی انعطاف پذیر) [۹]. ج) مدل ستون چند بخشی با ستون فقـرات<sup>۳</sup> (روش سـتون فقراتي صلب)[١٠].

دو فصلنامه علمی - پژوهشی دریافنون



(ج)

شکل(۱) روشهای ساخت مدل جهت آزمایشهای سازهای (الف) مدل هیدروالاستیک، (ب) مدل ستون فقراتی انعطاف پذیر و (ج) مدل ستون فقراتی صلب [۸،۹،۱۰].

## ۴- روش ستون فقراتی انعطاف پذیر

یکی از روشهای اندازه گیری نیروها و ممانهای اعمالی بر مدل شناور بهره گیری از روش ستون فقراتی انعطاف پذیر میباشد که توسط هرمانداستد ارائه گردید[۹]. دراین روش مدل شناور به چند بخش کاملا صلب تقسیم شده و سپس بخشهای صلب به کمک کرنش سنجهای مناسب به یکدیگر متصل می گردند. چنانچه مدل بهره گرفته شده بزرگ بوده و مشکل وزنی برای تعبیه کرنش سنج وجود نداشته باشد، آنگاه میتوان در انتهای هر بخش صلب ازمدل از یک فلنج استفاده نمود و سپس به کمک یک رابط تنظیم سختی و کرنش سنج، فلنجهای انتهایی دو بخش صلب را به یکدیگر متصل کرد (شکل(۲)).

در بسیاری از موارد، مدل های به کار رفت ه محدودیت های وزنی داررند و باید حداقل وزن را برای تجهیز آن در نظر گرفت. به همین علت باید بتوان از روشی جدید برای این منظور بهره گرفت که بهره گیری از لولای الاستیک است و همزمان دو بخش صلب را به یکدیگر متصل و از طرف دیگر به عنوان نیرو سنج عمل می نماید (شکل(۳)). البت ه برای استخراج ابعاد لولاهای الاستیک میبایست الزامات خاصی را در نظر گرفت. برای مدل شناور یک و نیم متری که در این مقاله به آن اشاره شده است، مشکلات وزنی جهت تجهیز آن وجود خواهد داشت و نمی توان از روشی که در شکل (۲) به آن اشاره شده است بهره گرفت. بدین جهت از روش ارائه شده در شکل (۳) بهره گرفته خواهد شد. این مدل شناور به چهار بخش تقسیم می گردد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fully Continuous Elastic Model

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Segmented Model with Elastic Spring Between Stiff Section (Flexible Backbone)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Segmented Model with a Continuous Backbone (Rigid Backbone)

سختى.

سال دوم - پاییز و زمستان ۱۳۹۴



شكل(٣) مدل ستون فقراتي انعطاف پذير با لولاي الاستيك.



جدول(۱) مقایسه روشهای ساخت مدل در انجام آزمایشهای سازهای [۵].

شکل(۴) دیاگرام سیستم جرم-فنر چهار درجه آزادی.

لذا یک مدل تئوری چهار درجه آزادی را می توان بـرای آن تعریـف کـرده و سـپس، سـختی مـورد نیـاز بـرای لـولای الاستیک را به کمک حل معادلات ارتعاشی استخراج نمود.

## ۵- مدل تئوری چهار درجه آزادی شناور در این مطالعه، بدنه شناور به چهار بخش تقسیم می گردد که هر یک صلب بوده و به کمک لولایی انعط اف پذیر به

بخش دیگر متصل می گردد. این نوع لولاهای انعطاف پذیر رفتاری مشابه با فنرهای پیچشی دارند ((شکل (۴))). در حین کوبش، بخش های جلویی وعقبی بدنه بصورت چرخشی و عکس یک دیگر ارتعاش می کنند و متقابلا سختیهای چرخشی فنرهای پیچشی، اولین مود ارتعاشی طولی بدنه شناور را تولید می کنند.

دو فصلنامه علمی – پژوهشی دریافنون

$$\begin{array}{l} (-m_1 x_4 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_4 x_2 - m_1 x_4 x_3 - m_2 x_4 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} - m_1 x_4 x_3 - m_2 x_4 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} - m_2 x_4 x_3 + m_4 x_5 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m}) \ddot{\theta_2} + (m_1 x_4 \frac{m_1 x_1}{m} - m_1 x_4 x_1 + m_2 x_4 \frac{m_1 x_1}{m} - m_4 x_5 \frac{m_1 x_1}{m}) \ddot{\theta_1} + K_2 (\theta_2 - \theta_3) + K_3 (\theta_4 - \theta_3) = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} (-I_4 + m_4 x_6 \frac{m_4 x_4}{m} - m_4 x_6 x_6) \ddot{\theta}_4 + \\ (m_4 x_6 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} + m_4 x_6 x_5) \ddot{\theta}_3 + \\ (m_4 x_6 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m}) \ddot{\theta}_2 + \\ (-m_4 x_6 \frac{m_1 x_1}{m}) \ddot{\theta}_1 - \mathbf{K}_3 (\theta_4 - \theta_3) = 0 \end{array}$$
 (1f)

با توجه به مشخص بودن جرم و دیگر پارامترهای هندسی، رابطه به مشخص بودن جرم و دیگر پارامترهای هندسی، رابطه  $\ddot{ heta}_i = -\omega_n^2 \theta_i$  ماتریس زیر تشکیل می گردد:  $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$ 

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = 0$$
(10)

هر یک از آرایه های ماتریس ارائـه شـده در معادلـه(15) را می توان بصورت زیر تعریف نمود:

$$\omega_n = (a-18)$$
فرکانس طبیعی (a-18)

$$a_{11} = \left(-m_1 x_1 \frac{m_1 x_1}{m} + m_1 x_1 x_1 + I_1\right) \omega_n^2 - K_1$$
 (b-19)

$$a_{12} = \left(m_1 x_1 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_1 x_3 - m_1 x_1 x_2\right) \omega_n^2 + K_1 \qquad (C-19)$$

$$a_{12} = 0$$

$$\begin{pmatrix} u_{13} - \\ (m_1 x_1 x_4 + m_1 x_1 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} \end{pmatrix} \omega_n^2 \qquad (d-19)$$

$$a_{14} = \left(m_1 x_1 \frac{m_4 x_4}{m}\right) \omega_n^2$$
 (e-19)

$$a_{21} = a_{12}$$
 (f-19)

$$a_{31} = a_{13}$$
 (g-19)  
 $a_{41} = a_{14}$  (h-19)

$$a_{22} = \left(I_2 + m_1 x_2 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_2 x_3 - m_1 x_2 x_2 + m_1 x_3 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_2 + m_2 x_3 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_2 + m_2 x_3 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_2 + m_2 x_3 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_2 + m_2 x_3 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_2 + m_2 x_3 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3 - m_2 x_3}{m} + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 + m_1 x_3 x_3 - m_1 x_3 x_3 + m_1 + m_1 x_3 + m_1 x_3 + m_1 x_3 + m_1 + m_1 x_3 + m_1 + m_1 + m_1 + m_1 + m_1 + m$$

$$m_2 x_3 x_3 \omega_n^2 - (K_1 + K_2)$$
 (i-19)

$$\begin{aligned} a_{23} &= \\ & \left( m_1 x_2 x_4 + m_1 x_2 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} + \right. \\ & m_1 x_3 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} + m_1 x_3 x_4 + \\ & m_2 x_3 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} - m_2 x_3 x_4 \right) \omega_n^2 + \\ & \mathrm{K}_2 \end{aligned}$$

سال دوم - پاييز و زمستان ۱۳۹۴ \_\_\_\_\_

معادلات حرکت برای سیستم جرم-فنر چهار درجه آزادی  
را می توان بصورت زیر نوشت. تعادل نیروی عمودی هر  
بخش مستلزم اعمال روابط زیر است:  

$$m_1(\ddot{y} + x_1\ddot{\theta}_1 + x_2\ddot{\theta}_2 + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3) = -V_1$$
 (۱)  
 $m_2[\ddot{y} + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3] = V_1 - V_2$  (۲)  
 $m_3\ddot{y} = V_2 - V_3$  (۴)  
 $m_4(\ddot{y} - x_6\ddot{\theta}_4 - x_5\ddot{\theta}_3) = V_3$  (۴)  
 $V_1x_1 - K_1(\theta_1 - \theta_2) = I_1\ddot{\theta}_1$  (۵)  
 $K_1(\theta_1 - \theta_2) - K_2(\theta_2 - \theta_3) + V_1x_2 + V_2x_3 = I_2\ddot{\theta}_2$ 

$$V_3 x_6 - K_3 (\theta_4 - \theta_3) = I_4 \ddot{\theta}_4 \tag{(A)}$$

با جایگذاری معادله (۱) در معادله (۲) مقدار V2 بدست می آید:

$$y = \frac{m}{(m_1 x_4 + m_2 x_4 - m_4 x_5)\ddot{\theta}_3 + m_4 x_6 \ddot{\theta}_4}}{m}$$
(1.)

با جایگذرای معادله (۴) و (۹) و (۹) مقدار <sup>Ÿ</sup> بدست  

$$(-m_1 x_1 \frac{m_4 x_4}{m})\ddot{\theta}_4 + (-m_1 x_1 \frac{m_1 x_4}{m} - m_1 x_1 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m})\ddot{\theta}_3 + (-m_1 x_1 \frac{m_1 x_2 - m_1 x_3}{m} - m_1 x_1 x_3 + m_1 x_1 x_2)\ddot{\theta}_2 + (m_1 x_1 \frac{m_1 x_1}{m} - m_1 x_1 x_1 - I_1)\ddot{\theta}_1 - K_1(\theta_1 - \theta_2) = 0$$
(۱۱)

$$\begin{array}{l} -m_{1}x_{2}\left(\frac{m_{4}x_{4}}{m}\ddot{\theta}_{4}+\frac{m_{2}x_{4}-m_{4}x_{5}-m_{1}x_{4}}{m}\ddot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{1}}{m}\ddot{\theta}_{1}+x_{1}\dot{\theta}_{1}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\ddot{\theta}_{2}+x_{4}\dot{\theta}_{3}\right)-m_{1}x_{3}\left(\frac{m_{4}x_{4}}{m}\ddot{\theta}_{4}+\frac{m_{2}x_{4}-m_{4}x_{5}-m_{1}x_{4}}{m}\ddot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{1}}{m}\ddot{\theta}_{1}+x_{1}\ddot{\theta}_{1}-x_{2}\ddot{\theta}_{2}+x_{3}\ddot{\theta}_{2}+x_{4}\ddot{\theta}_{3}\right)-m_{2}x_{3}\left(\frac{m_{4}x_{4}}{m}\ddot{\theta}_{4}+\frac{m_{2}x_{4}-m_{4}x_{5}-m_{1}x_{4}}{m}\ddot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{1}}{m}\ddot{\theta}_{1}+x_{3}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{1}}{m}\ddot{\theta}_{1}+x_{3}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{1}}{m}\ddot{\theta}_{1}+x_{3}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{1}}{m}\ddot{\theta}_{1}+x_{3}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{1}+x_{3}\ddot{\theta}_{2}-\frac{m_{1}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{2}-m_{1}x_{3}-m_{2}x_{3}}{m}\dot{\theta}_{3}+\frac{m_{1}x_{3}-m_$$

$$(-m_{1}x_{4}\frac{m_{4}x_{4}}{m} - m_{2}x_{4}\frac{m_{4}x_{4}}{m} + m_{4}x_{5}\frac{m_{4}x_{4}}{m} - m_{4}x_{5}x_{6})\ddot{\theta}_{4} + (-I_{3} - m_{1}x_{4}\frac{m_{2}x_{4} - m_{4}x_{5} - m_{1}x_{4}}{m} - m_{1}x_{4}x_{4} - m_{2}x_{4}\frac{m_{2}x_{4} - m_{4}x_{5} - m_{1}x_{4}}{m} + m_{2}x_{4}x_{4} + m_{4}x_{5}\frac{m_{2}x_{4} - m_{4}x_{5} - m_{1}x_{4}}{m} + m_{4}x_{5}x_{5})\ddot{\theta}_{3} + (1\%)$$

سختی هیدرواستاتیک از رابطه(۱۸) بدست آمده است:
$$k = \rho g \int_{0}^{x} B(x) x^{2} dx$$
 (۱۸)

(x) 
$$B(x)$$
 عرض صفحه آبخور محلی  
 $P$ : چگالی سیال  
فرکانس طبیعی مدل با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس  
معادله (۱۴) و در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده در  
معادله (۱۴) و در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده در  
معادله (۱۴) و در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده در  
معادله (۱۴)  $(16\omega^6 + 3200\omega^4 - 3.72 * 10^5\omega^2)$   
 $(19)$   
 $4.152\omega^8 + 616\omega^6 + 3200\omega^4 - 3.72 * 10^5\omega^2 = 0$ 

(۲۰)  $\omega^2 = 0$  (۲۰) از شکل(۵) می توان مقدار فرکانس طبیعی مدل چهار درجه آزادی را برابر با ۴٬۶۱ *هرتز* بدست آورد.

#### ۵-۱- طراحي لولاي الاستيك مناسب

برای انجام آزمایشات مدل چند بخشی هیدروالاستیک، دو قید بسیار مهم برای استخراج مشخصات ابعادی لولای الاستیک وجود دارد: ۱- ممان خمشی: مقدار ممان حداکثر اعمالی بر هر یک از مقاطع با بهره گیری از ضریب مقیاس، از شناور واقعی به مدل انتقال داده می شود. با استفاده از قوانین تشابه می توان ارتباط بین ممان و سختی خمشی در شناور واقعی و

$$[EI]_M = \frac{1}{\lambda^5} [EI]_S \tag{(1)}^4$$

$$M_m = M_s\left(rac{1}{\lambda}
ight)$$
 (۲۲)  
E: مدول الاستیسیته بر حسب  $N/m^2$   
I: ممان اینرسی  
M: گشتاور خمشی  
 $\lambda$  ضریب مقیاس

Signification of the second se

شکل(۵) دترمینان ماتریس ۴ درجه آزادی سیستم جرم-فنر برای تعیین اولین فرکانس مودال طولی مدل شناور ۱٫۵ متری.

$$a_{24} = \left(m_1 x_2 \frac{m_4 x_4}{m} + m_1 x_3 \frac{m_4 x_4}{m} + m_2 x_3 \frac{m_4 x_4}{m} + m_2 x_3 \frac{m_4 x_4}{m}\right) \omega_n^2$$
 (k-19)

$$a_{32} = a_{23}$$
 (l-19)

$$a_{42} = a_{24}$$
 (m-19)

$$a_{33} = \left(I_3 + m_1 x_4 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} + m_1 x_4 x_4 + m_2 x_4 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} - m_2 x_4 x_4 - m_4 x_5 \frac{m_2 x_4 - m_4 x_5 - m_1 x_4}{m} - m_4 x_5 x_5\right) \omega_n^2 - (K_2 + K_3)$$
(n-19)

$$a_{34} = (m_1 x_4 \frac{m_4 x_4}{m} + m_2 x_4 \frac{m_4 x_4}{m} - m_4 x_4 \frac{m_4 x_4}$$

$$m_4 x_5 \frac{m_4 x_4}{m} + m_4 x_5 x_6) \omega_n^2 + K_3 \qquad (0-19)$$
  
$$a_{43} = a_{34} \qquad (p-19)$$

$$a_{44} = (I_4 - m_4 x_6 \frac{m_4 x_4}{m} + m_4 x_6 x_6) \omega_n^2 - K_3 \qquad (q-19)$$

مقدار فرکانس طبیعی در دستگاه معادلات (۱۵) مجهول بوده که پس از حل دستگاه مقدار فرکانس طبیعی، بدست خواهد آمد. برای محاسبه مقدار پاسخ فرکانس خیس در سیستم چهار درجه آزادی، از تقریب جرم افزوده استفاده شده است. برای محاسبه جرم افزوده از تقریب جرم نیم دایره استفاده شده است بگونهای که قطر دایره با عرض دایره استفاده شده است بگونهای که قطر دایره با عرض ممان اینرسی جرمی حول مرکز شناوری برای هر بخش از بدنه با انتگرال گیری بر روی طول بدنه شناور مطابق رابطـه زیر بدست میآید:

جدول(۲) پارامترهای فیزیکی بکار رفته در مدل.

پارامتر	طول(mm)	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
x1	260	m1	1000 gr	K3	3000 N/m
x2	120	m2	1000 gr	I1	0.35
					Kg.m <sup>2</sup>
x3	130	m3	1350 gr	I2	0.1 Kg.m <sup>2</sup>
x4	160	m4	1000 gr	I3	0.5 Kg.m <sup>2</sup>
x5	140	K1	3000	I4	0.3 Kg.m <sup>2</sup>
			N/m		
xб	140	K2	3000		
			N/m		

۲- فرکانس مودال: برای اینکـه بتـوان متناسـب بـا شـناور واقعــی بــه یــک انعطــاف پــذیری مناســبی در مــدل هیدروالاستیک چند بخشی رسـید بایـد از تشـابه فرکـانس مودال مطابق رابطه(۲۳) استفاده کرد.

برای اینکه بتوان بکمک آزمایش مدل مقدار فرکانس مودال را اندازه گیری نمود ابتدا مدل را در شرایط بالاست و تریم مبتنی بر شناور واقعی در حوضچه قرار داده شده و سپس با اعمال یک ضربه در جلوی مدل، مدل را به حرکت اجباری پیچ واداشته می شود. با استفاده از شتاب سنج، نمودار شتاب در حوزه زمان ترسیم و بکمک تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال داده می شود (شکل(۵)).

به کمک اندازه گیری و حل معادلات می توان مقدار فرکانس مودل اولیه را پیدا نمود که بایستی با یکدیگر همخوانی داشته باشند. چنانچه مقادیر بدست آمده تفاوت داشته باشد بایستی ابعاد لولای الاستیک تغییر داده شده و مجددا آزمایش را تکرار تا به انعطاف پذیری متناسب با شناور واقعی دست پیدا نمود.

#### ۵-۲- طراحی لولای انعطاف پذیر

از محدودیت های اصلی در ساخت مدل شناور هدف جهت آزمایشات سازهای، وزن نهایی مدل می باشد که سعی گردید از لولایی با حداقل وزن که دارای سختی مناسب برای داشتن انعطاف پذیری کافی باشد استفاده شود. به همین منظور از لولاهای الاستیک مطابق شکل (۶) بهره گرفته شد که جهت رسیدن به خواسته های مورد انتظار دارای ضخامت های متفاوت می باشد. برای تعیین پارامترهای تاثیر گذار بر سختی و استحکام کلی، یک سری آزمایشات بر روی لولای الاستیک انجام گرفت.





شکل(۶) انتقال شتاب اندازه گیری شده در حوزه زمان.

هر چند که در ساخت بدنه مدل از مواد سبک (فایبر گلاس) بهره گرفته خواهد شد ولی مهمترین فاکتور در آزمایشات کاهش وزن لولا می باشد. از آلومینیوم سری ۵۰۸۳ در ساخت بهره گرفته شده است. برای ساخت لولای الاستیک از پروفیل قوطی با مشخصات 32x32 استفاده شده و محل پیچهای بکار رفته در شکل نشان داده شده است. طول لولای الاستیک (دا) به عنوان تابعی مستقیم از سختی لولای الاستیک بوده و ضریب سختی لولای الاستیک را می توان بکمک رابطه (۲۴) بدست آورد:

$$K_{\rm th} = \frac{M}{\theta} = \frac{EI}{l_{\rm b}} \tag{(74)}$$

 $\theta$  سختى تئورى لولاى الاستيك، M گشتاور اعمالى،  $K_{th}$ چرخش زاویهای تیر، E مدول الاستیسیته مواد و I گشتاور دوم سطح مقطع عرضی تیر می باشد. برای بررسی اثرات استحکام نهایی و سختی در اثر کاهش ضخامت دیواره و وزن لولای الاستیک، آزمایشات خمشی بر روی لولای الاستيك با ضخامت ديواره متفاوت صورت پذيرفته است. چهار عدد لولای الاستیک نمونه با سختی برابر با 3000 نیوتن متر/رادیان و ضخامتهای ۴، ۸، ۱۲ و۱۵ میلیمتر ساخته شد. با استفاده از دستگاه خمش در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشكده مهندسي مكانيك دانشگاه صنعتى امیرکبیر لولاهای ساخته شده تحت آزمایش خمش قرار گرفتند (شکل۷). مشاهده گردید که با افزایش در ضخامت دیواره لولا، استحکام نهایی افزایش می یابد و از طرفی ضریب اطمینان لولای الاستیک نیز افزایش می یابد. در شکل(۸) رابطه نیرو و خیز برای نمونه های مورد آزمایش ارائه شده است.

از مهمترین مواردی که در حین انجام آزمایشات در حوضچه کشش مد نظر می باشد اینست که لولای الاستیک که به عنوان نیرو سنج استفاده می شود دارای استحکام کافی در مقابل نیروی وزن در هنگام جابجایی

دو فصلنامه علمی - پژوهشی دریافنون

سال دوم - پاییز و زمستان ۱۳۹۴

مدل و دیگر نیروهای اعمالی در هنگام آزمایش را داشته باشد. بنابراین هر چند که ضخامت ۴ میلیمتر دارای وزن کمتری می باشد ولی مطابق شکل۹(الف) مشاهده می گردد که دچار شکست گردیده است. لذا با مقایسه نمونههای ساخته شده و انجام آزمایشات خمش بر روی آنها و در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب، لولای با ضخامت ۸ میلیمتر به عنوان لولای الاستیک دلخواه انتخاب گردید. این لولا علاوه بر استحکام کافی دارای انعطاف پذیری مناسب نیز است.

۵-۳ پیادهسازی لولای الاستیک در مدل مورد آزمایش

برای انجام آزمایشات سازهای در مدل شناور بایستی بتوان مطابق روشهای پیش گفته، لولای انعطاف پذیر را در شناور جایگذاری نمود. پس از آماده سازی مدل و نصب ستون فقرات در داخل آن می باستی درجات آزادی لولای الاستیک را کنترل نمود.





شکل(۷) مکانیزم در نظر گرفته شده برای آزمایش لولای الاستیک.



شکل (۸) رابطه مقدار خیز(میلیمتر) با نیرو(کیلوگرم) برای لولای الاستیک با ضخامت های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلیمتر.

دو فصلنامه علمی - پژوهشی دریافنون



شکل (۹) مکانیزم شکست لولای الاستیک Nm/rad 3000 به عنوان تابعی از ضخامت دیواره برای ضخامتهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلیمتر.

با استفاده از یک سری قیود این عمل انجام گرفت. هدف اصلی در طراحی و ساخت لولای الاستیک، تولید نیروسنج مناسب جهت یک مدل شناور خاص می باشد که با توجه به مشخصات هندسی و نوع مواد بکار رفته در ساخت شناور واقعی این نیروسنج متفاوت خواهد بود. ولی می توان اذعان داشت که فرایند طراحی وانتخاب می تواند یکسان باشد. پس از نصب کرنش سنج بر روی لولای الاستیک، نیروسنج تولید و در مدل شناور نصب گردید. نیروسنج بدست آمده شرایط انعطاف پذیری مناسب و استحکام را ارضا نموده است (شکل(۹))

بر همین اساس لاوروف و همکاران [۸] از یک لولای الاستیک برای استفاده در انجام آزمایشات بهره گرفتند. نتایج بدست آمده در حوزه خطی تناسب خوبی با اندازه گیریهای انجام گرفته در این تحقیق دارد ( شکل(۱۰))

#### ۶- جمعبندی و نتیجهگیری

جهت پیش بینی پاسخ سازهای شناورهای جدید و معتبرسازی روشهای عددی نیاز است که آزمایش سازهای بر روی مدل صورت پذیرد. سه روش مختلف برای آزمایش مدل وجود دارد که اخیرا به مدل با ستون فقراتی انعطاف پذیر توجه ویژهای شده است. مهمترین عامل در بکارگیری این روش چگونگی استخراج مشخصات ابعادی لولای الاستیک می باشد. لولای الاستیک بایستی علاوه بر داشتن استحکام کافی متناسب با شناور واقعی از انعطاف پذیری معادل با شناور واقعی برخوردار باشد. ساده ترین راه

ستون فقرات) و لولای چهار ضلعی مناسب به عنوان رابط بخشهای مختلف بدنه و بستر نیرو سنج می باشد. در این مقاله فرایند استخراج مشخصات ابعادییک لولای الاستیک براییک مدل شناور تک بدنه تندرو جابجایی مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل (۱۰) نیروسنج تولید شده از لولای الاستیک و بکار رفته در مدل شناور جهت انجام تست سازهای.





پس از انجام آزمون های سازهای و بر اساس انعطاف پذیری مدل شناور چند بخشی هیدروالاستیک لولای الاستیک با ضخامت ۴ میلیمتر به عنوان انتخاب نهایی برگزیده شد. این لولای علاوه بر سختی مناسب، انعطاف پذیری مناسبی را برای مدل ساخته شده در انجام آزمایشات را فراهم می آورد. با توجه به محدودیت های وزنی بایستی بتوان نیروسنجهای مناسبی جهت انجام تست سازهای استفاده نمود. شناور مورد آزمایش یک شناور جدید مے باشد که بطور قطعی نمی توان از قوانین ارائه شده در موسسات رده بندی برای محاسبه بارهای اعمالی بر آن بهره گرفت. لذا الزاما می بایستی یک لولای مناسب جهت تولید نیروسنج، که کلیه شرایط تشابه را ارضاء نماید طراحی و ساخته شود. اینگو درامامن [۷] با توجه به بزرگ بودن مدل از یک لولای متفاوت بھرہ گرفتہ است ولے با توجہ بہ شرایط آزمایشگاهی، در این تحقیق می بایستی از مدل کوچک استفادہ نمود که الزاما مے بایستی از لولای واحدی کے بتواندجوابگوی آزمایشات باشد استفاده می شد. روش و نتایج بدست آمده با منبع ۸ همخوانی مناسبی دارد.

#### ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از ریاست محترم سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نداجا و مسئول محترم کارگاه جهت ساخت لولاهای الاستیک اعلام میدارند. همچنین، از آقای دکتر علیزاده وقاصلو، مسئول محترم آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، در خصوص انجام آزمایشهای

1296	زمستان	و	پاييز	-	دوم	سال
------	--------	---	-------	---	-----	-----

، بە	،، کمال تشکر و قدردانی	لاستيك	خمش بر روی لولاهای ا/
			عمل ميآيد.
			فهرست علائم :
C	مرکز جرم بخش	A	زاويه پيچش
<b>C</b> 1	عقبی(بخش اول)	U	
$C_2$	مرکز جرم بخش دوم	ω	فركانس
$C_3$	مرکز جرم بخش سوم	т	جرم کل بدنه
C	مرکز جرم بخش		جرم بخش بخش
<b>L</b> 4	جلويی(بخش چهارم)	$m_1$	عقبی(بخش اول)
	فاصله فنر پیچشی		جرم بخش دوم
<i>x</i> <sub>1</sub>	عقبی تا مرکز جرم	$m_2$	
	بخش عقبى		
	فاصله فنر پیچشی		جرم بخش سوم
<i>x</i> <sub>2</sub>	میانی تا مرکز جرم	$m_3$	
	بخش عقبى		
	فاصله فنر پیچشی		جرم بخش جلویی( بخش
<i>x</i> <sub>3</sub>	میانی تا مرکز جرم	$m_4$	چهارم)
	بخش میانی		
F	مدول الاستيسيته،	К.	سختی فنر پیچشی عقبی
E	N/m <sup>2</sup>	$\mathbf{n}_{1}$	
$\omega_n$	فركانس طبيعي	$K_2$	سختی فنر پیچشی میانی
ΕI	ضريب صلبيت خمشي	$K_3$	سختی فنر پیچشی جلویی
$K_t$	سختى تئورى لولاى	V	نیروی برشی
h	الاستيك	•	
g	شتاب گرانش	т	زیر نویس مدل کشتی
S	زيرنويس كشتي واقعي		

#### ۷- مراجع

 Thomas, G., Davis, M.R., Holloway D. S. and Roberts T. J., "Transient Dynamic Slam Response of Large High-speed Catamarans", 7<sup>th</sup> International Conference on Fast Sea Transportation, pp.1-5, 2011.
 Davis, M. R., Holloway D.S. and Watson N.L., "Validation of non-linear Wave Loads Predicted by Time Domain Method in Sea Trials of an 86m Catamaran", 8th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST '05, pp. 1-4, 2005.

[3] Korkut, E., Atlar, M. andIncecik, A., "An Experimental Study of Global Loads Acting on an Intact and Damaged Ro–Ro Ship Model", Ocean Engineering, Vol. 32, pp. 1370–1403, 2005.

[4] Chan, H. S., Atlar, M. and Incecik, A., "Global Wave Loads on Intact and Damaged Ro-Ro Ships in Regular Oblique Waves", Marine Structures, Vol. 16, pp. 323–344, 2003.

[5] Yamamoto, Y., Fujino, M. and Fukasawa, T., "Motions and Longitudinal Strength of a Ship in Head Sea and Effects of Non-Linearities" ,J. Soc Nav. Archit. Jpn, Vol. 13, pp.144-205, 1979.

[6] Nawwar, A. M., Godon, A., Root, T., Howard, D. and Bayly, I. M., "Development of a Measuring System for Segmented Ship Model", 1989.

[7] Ingo, D., "Experimental and Numerical Investigation of Nonlinear Wave-Induced Load Effects in Containerships Considering Hydroelasticity", Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Marine Technology, PhD Thesis, 2008.

[8] Jason, L.; Michael, R. D.; Damien, S. H. and Thomas, G., "Experimental Analysis Of The Wet Flexural Mode Response Of An Npl 6a Hydroelastic Segmented Model", University of Tasmania, Hobart, Tasmania, Australia, 5<sup>th</sup> International Conference on High Performance Marine Vehicles, pp. 8-10, Nov. 2006.

[9] Aarsnes, J., "Experimental Techniques for Local and Global Hydroelastic Effects on Ships, in 'Seminar on Hydroelasticity in Marin Technology", Trondheim, Norway, 1996.

[10] Hermundstad, O., "Theoretical and Experimental Hydroelastic Analysis of High Speed Vessels", PhD thesis, The Norwegian University of Science and Technology, 1995.

[11] Keuning, J., "Distribution of Damping and Added Mass Along the Length of a Ship Model Moving at High Forward Speed", International Shipbuilding Progress, Vol. 37, No. 41, pp. 123–150, 1990.

[12] ITTC.sname.org/CD%202011/.../7.5-02-05-04

[13] Chan, H. S., "Prediction of Large Amplitude Motions, Wave Loads on a Ro-Ro Ship in Regular Obliquewaves in Intact and Damage Conditions", DTR-4.1-NEW-12.98, DEXTREMEL project BE97-4375, 1998.